

## 基于性能的混凝土结构抗震设计优化与实践研究

王江

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**在我国地震多发的背景下,混凝土结构的抗震设计已成为建筑工程领域研究的重点。传统的抗震设计多以承载力为核心目标,虽能满足结构安全需求,但在地震作用不断增强、建筑功能日益多样化的情况下,其局限性逐渐显现。基于性能的抗震设计理念强调结构在不同地震水准下满足相应的性能目标,从而实现建筑安全、经济与功能三者的综合平衡。文中系统分析了基于性能的混凝土结构抗震设计的理论基础、设计流程与关键技术,从结构性能目标设定、结构反应预测方法、动力分析模型构建到构件耗能机制优化等方面进行了深入探讨。同时,通过对设计流程中参数敏感性、材料性能、构造措施与整体体系的综合分析,提出适用于不同类型混凝土结构的设计优化策略。研究结果表明,基于性能的抗震设计策略可在保证结构整体安全性的前提下,显著提升结构的延性与耗能能力,降低地震造成的损失,并提高全生命周期性能。文章最后提出推广此类设计方法的技术路径和未来发展方向,以期为现代建筑抗震设计提供可借鉴的理论与实践依据。

**[关键词]**混凝土结构; 基于性能的抗震设计; 动力分析; 结构延性; 设计优化

DOI: 10.33142/ucp.v3i1.19217

中图分类号: TU391

文献标识码: A

### Performance Based Optimization and Practical Research on Seismic Design of Concrete Structures

WANG Jiang

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Against the backdrop of frequent earthquakes in China, seismic design of concrete structures has become a focus of research in the field of construction engineering. Traditional seismic design often focuses on bearing capacity as the core objective. Although it can meet the safety requirements of structures, its limitations gradually become apparent in the context of increasing seismic effects and diverse building functions. The performance-based seismic design concept emphasizes that the structure should meet corresponding performance goals under different earthquake levels, thereby achieving a comprehensive balance between building safety, economy, and functionality. The article systematically analyzes the theoretical basis, design process, and key technologies of performance-based seismic design for concrete structures, and explores in-depth aspects such as setting structural performance goals, predicting structural response methods, constructing dynamic analysis models, and optimizing component energy dissipation mechanisms. Meanwhile, through comprehensive analysis of parameter sensitivity, material properties, construction measures, and overall system in the design process, design optimization strategies applicable to different types of concrete structures are proposed. The research results indicate that performance-based seismic design strategies can significantly improve the ductility and energy dissipation capacity of structures, reduce losses caused by earthquakes, and enhance the overall life cycle performance while ensuring the overall safety of the structure. At the end of the article, the technical path and future development direction for promoting such design methods are proposed, in order to provide theoretical and practical basis for modern building seismic design that can be referenced.

**Keywords:** concrete structures; performance based seismic design; power analysis; structural ductility; design optimization

### 引言

混凝土结构在我国建筑工程体系中占据绝对主导地位,其抗震性能直接关系到地震灾害下的人员安全与财产损失控制。长期以来,我国混凝土结构抗震设计以“承载能力”为主要控制指标,设计思想以安全储备为核心。然而,地震破坏过程极为复杂,不同地震水准对结构造成的影响差异明显,传统设计方法往往无法实现结构性能的精准控制,也不利于建筑功能的地震后可恢复性。因此,基于性能的抗震设计理念逐步兴起,并成为国际抗震设计的重要趋势。该理念强调将地震作用划分为多种水准,结构在不同水准下具有相对应的可量化性能目标,通过细化分

析与设计优化,使结构在实际地震中表现更为可靠、经济与可控。为了推动该理念在我国混凝土结构领域更好地落地,本文从理论、方法与实践层面系统展开研究,为工程应用提供科学依据。

### 1 基于性能的混凝土结构抗震设计理念与理论基础

#### 1.1 基于性能的抗震设计理念的形成与发展

基于性能的抗震设计(Performance-Based Seismic Design, PBS D)源于现代抗震工程对结构破坏机理的深入认识,其理论基础在于:地震作用不可避免,但可通过对结构性能进行目标化控制,使破坏过程趋于可控与可接受。

该理念突破了传统抗震设计仅追求“结构不倒”的单一思路,引入“功能可恢复”“损伤可控”“经济合理”等更综合的性能指标,从而实现安全、功能与成本之间的平衡。国际上,美国 ATC-40 与 FEMA 系列指南的发展推动了基于性能的设计成熟化,而我国在此基础上不断结合工程实践特色,形成适应本国建筑结构类型、材料特性及地震环境的设计体系。

## 1.2 混凝土结构抗震性能的影响因素分析

混凝土结构的抗震性能受多个因素影响,包括材料性能、构件延性、体系布置、受力路径、节点连接质量以及建筑整体刚度分布等。其中,混凝土材料的抗压强度、钢筋的屈服特性与构件的配筋方式直接决定结构的承载力与延性;结构布置与质量分布影响结构动力特性,如周期、阻尼与振型;节点区域的受力稳定性则决定结构的整体变形协调能力。基于性能的设计需统筹考虑不同因素,确保结构在不同地震等级作用下达到既定性能。

## 1.3 结构性能目标体系的构建原则

性能目标体系是 PBSD 的核心。常见性能目标包括:小震不坏、中震可修、大震不倒。构建性能目标需遵循可量化、可评估与可实施原则,基于结构使用功能与重要性等级,结合不同地区的地震风险进行设定。例如,对普通公共建筑,可要求在小震下结构保持弹性;中震下局部构件出现可修复损伤;大震下结构避免整体倒塌。性能目标的合理设定为后续动力分析、设计优化提供基础。

## 2 基于性能的混凝土结构抗震分析方法

### 2.1 结构反应谱分析与适用条件

反应谱分析是 PBSD 的基础分析方法,通过地震动反应谱评估结构在不同地震强度下的最大响应,适用于周期范围较明确且地震响应规律较稳定的结构体系。在混凝土框架、框架-剪力墙结构中,反应谱分析可较准确预测位移与层间变形趋势,对性能目标校核具有重要意义。

### 2.2 弹塑性动力分析与非线性模拟

为了精确评估结构在强震中的变形、塑性发展与能量耗散情况,非线性动力分析被广泛应用。该方法基于实际材料行为构建非线性模型,通过输入地震波模拟强震下的结构响应。非线性时程分析能够捕捉构件开裂、钢筋屈服、节点剪切变形等细节,是 PBSD 中最能反映结构真实性能的方法。

### 2.3 基于性能的结构损伤评估模型

混凝土结构损伤评估可采用位移指标、塑性铰发展程度、构件损伤指数等方法。例如 Park-Ang 损伤模型综合考虑位移与能量耗散,是混凝土构件损伤评估常用指标。通过损伤模型可对构件在不同地震作用下的疲劳损伤进行量化评估,为性能目标的实现提供判断依据。

## 3 混凝土结构抗震优化设计关键技术

### 3.1 结构体系布置的优化

结构体系的整体布置对抗震性能具有决定性作用。适

用于 PBSD 的结构需满足规则性、连续性与受力路径清晰等原则。水平与竖向刚度分布需保持均匀,避免因扭转效应或软弱层引发灾难性破坏。结构布置优化应通过多方案对比,结合动力分析结果确定最优体系。

### 3.2 构件延性提升措施

混凝土构件的延性水平直接决定结构在地震作用下的变形能力和耗能效果,是评价抗震性能的重要指标。通过提高箍筋配筋率,可有效约束核心混凝土,延缓裂缝扩展并提升变形承载能力。高延性钢筋的应用有助于改善构件受拉性能,使其在反复荷载作用下保持稳定受力状态。截面尺寸的合理优化能够在满足承载要求的基础上增强构件延展性,节点区域的约束加强则有利于保证力的传递连续性。塑性铰区的明确设置与针对性强化设计,使构件在强震中优先形成可控的塑性变形区域,将损伤集中于局部位置,从而保护整体结构安全。

### 3.3 耗能减震技术的集成应用

现代建筑结构中,新型减震技术的应用日益广泛,阻尼器、剪切型耗能构件以及调谐质量减振装置等手段,为结构抗震性能提升提供了有效途径。对于高层和超高层混凝土结构而言,地震作用下的位移控制和内力分配尤为关键,合理设置耗能构件能够在强震来临时吸收大量输入能量,降低主体结构受损程度。基于性能的抗震设计强调整体响应控制,需要从结构体系层面统筹考虑耗能构件的布置位置、数量和性能参数,使其与主体结构形成协同工作机制。通过对全结构动力响应的分析与优化,可在较小构造调整的前提下获得显著耗能效果,实现以较低成本满足既定性能目标。这种精细化设计思路有助于提升结构安全性与经济性,使减震技术在实际工程中发挥更大价值。

## 4 基于性能的混凝土结构抗震设计实践路径

### 4.1 设计流程的系统化实施

基于性能的抗震设计流程以明确的性能目标为起点,通过结构建模与分析,对不同地震水准下的结构响应进行评估,并在性能校核基础上不断修正设计方案。各阶段之间并非孤立存在,而是通过信息反馈形成动态调整过程。设计者在建模分析后对结构响应结果进行判读,将实际性能与目标要求进行对比,从而判断结构是否满足预期表现。当中震条件下的变形或损伤指标超出控制范围时,可通过增强构件承载能力、改善延性性能或引入附加减震构件等方式进行优化调整。设计修正后需再次进行分析与校核,确保调整措施达到预期效果。系统化实施强调设计过程的连续性和可追溯性,使结构性能在反复优化中逐步趋于合理。该流程有助于提高设计精度,使 PBSD 理念在工程实践中得到有效落实。

### 4.2 参数敏感性分析与优化

在基于性能的抗震设计体系中,参数敏感性分析为提升结构设计效率和可靠性提供了重要技术支撑。通过系统

分析配筋率、节点承载力、构件延性指标以及材料强度等关键参数对结构整体性能的影响程度,设计人员能够更加清晰地识别决定性因素。不同参数在结构响应中的作用权重存在差异,敏感性分析有助于将设计关注点集中在对性能贡献最显著的部分,从而提高设计的针对性。量化分析结果为参数取值调整提供依据,使设计过程更加精细和可控。合理优化关键参数配置,不仅能够满足既定性能目标,还可避免过度设计带来的资源浪费。参数敏感性分析在安全性与经济性之间建立有效平衡,为 PBSD 理念在工程实践中的高效应用提供了有力支持。

### 4.3 设计与施工一体化的落实

基于性能的抗震设计要在实际工程中发挥应有效果,离不开施工阶段对设计意图的精准落实。结构性能目标不仅体现在图纸和计算结果中,更依赖施工过程中的质量控制与技术执行水平。施工质量的稳定性、材料性能的一致性以及关键构造节点的处理方式,都会对结构在地震作用下的实际表现产生直接影响。任何环节的偏差,都可能削弱设计阶段设定的性能目标。通过建立覆盖施工全过程的质量控制体系,将设计要求细化为可检查、可追溯的施工标准,有助于减少施工误差。设计、施工与监理之间形成高效协同机制,可及时发现并纠正问题,确保关键部位严格按照性能要求实施。多方协作与全过程管控,使 PBSD 理念从理论设计转化为真实可靠的工程性能,为结构抗震安全提供坚实保障。

## 5 基于性能的混凝土结构抗震设计的趋势与展望

### 5.1 数字化技术在 PBSD 中的应用

随着 BIM、数字孪生与智能分析技术的持续发展,基于性能的抗震设计正在与建筑数字化模型实现更深层次的融合。通过将结构性能参数、构件信息和分析结果集成到数字模型中,结构在设计、施工和运营阶段的性能状态能够以直观方式呈现,实现全过程可视化管理。数字孪生平台在此基础上建立与实体结构相对应的虚拟模型,使结构响应和性能变化得以实时反映。运行过程中,监测数据不断反馈至平台,为结构状态评估提供可靠依据。地震发生后,数字化模型能够快速辅助判断受损位置和程度,提升评估效率,为维修决策提供精准支持。数字技术与 PBSD 理念的结合,使结构管理由事后判断转向持续监测和主动管理,为建筑抗震安全和运行维护带来新的发展方向。

### 5.2 材料性能提升带来的设计革新

超高性能混凝土、纤维增强混凝土以及新型高延性钢筋的不断发展,为基于性能的抗震设计提供了更加坚实的材料基础。这类材料在强度、延性和耐久性方面表现突出,使结构构件在承受地震作用时具备更优的变形能力和耗能性能。材料性能的提升使构件截面尺寸得以减小,在满足承载和变形要求的前提下降低结构自重,从而有效减轻地震惯性力对整体结构的不利影响。高延性材料在受震过

程中能够延缓裂缝发展,改善破坏形态,使结构响应更加可控。材料层面的进步为抗震设计提供了更大的自由度,使性能目标的实现不再过度依赖构件放大或复杂构造措施。材料创新与 PBSD 理念的结合,有助于在安全性、经济性与结构性能之间取得更优平衡,推动抗震设计向更高水平发展。

### 5.3 性能评估标准体系的完善

我国基于性能的抗震设计标准体系正处于不断发展和完善阶段,为工程实践提供了重要技术支持。为进一步提升其应用效果,有必要在现有框架基础上细化性能等级的划分,使不同地震水准下的结构目标更加清晰明确。评估指标体系的完善,有助于将结构变形、损伤程度和功能保持能力等关键性能要求量化表达,增强设计判断的准确性。设计流程的规范化和细化,使性能目标、分析方法与构造措施之间形成清晰对应关系,减少工程应用中的不确定性。标准内容与工程实际的紧密结合,有利于提高设计人员对 PBSD 理念的理解和接受程度。随着技术路径逐步成熟,标准体系的可操作性不断增强, PBSD 在实际工程中的应用范围和普及程度也将随之提升,为建筑抗震安全提供更加可靠的技术保障。

## 6 结论

基于性能的混凝土结构抗震设计突破了以承载力为核心的传统思路,将关注重点转向结构在不同地震水准下的实际表现与可控损伤。该方法通过明确多级性能目标,使结构在小震、中震和大震作用下分别满足使用、修复和防倒塌要求。通过合理的结构体系布置与受力路径优化,结构整体受震响应更加均匀;构件延性设计与细部构造改进,有效提升耗能能力和变形能力。耗能装置的合理设置可在地震中分担能量输入,降低主体结构损伤程度。全过程数字化设计与分析手段的引入,使性能评估更加直观、精细。结合全生命周期视角开展性能优化,有助于在安全性、经济性与可维护性之间取得平衡。随着新材料应用和数字技术持续进步, PBSD 理念将在混凝土结构抗震设计中展现更广阔的应用前景。

### [参考文献]

- [1]王海军,刘志明.基于性能的混凝土框架结构抗震设计研究[J].建筑结构学报,2019,40(12):115-123.
- [2]赵明,张伟.节能型混凝土结构减震与耗能设计方法研究[J].工程力学,2020,37(8):90-98.
- [3]周强,王立新.性能化抗震设计理论在混凝土结构中的应用[J].工程抗震,2017,39(5):50-58.
- [4]刘建军,何鹏飞.混凝土结构抗震性能影响因素及优化设计分析[J].世界地震工程,2018,34(3):142-149.

作者简介:王江(1987.6—),男,汉族,毕业院校:河北建筑工程学院,现就职单位:中土大地国际建筑设计有限公司。